岩石力学の新しい展開

——ミクロからマクロまで——

2. 各種条件下における岩石の力学挙動——硬岩[†]

稲田 善紀* 山辺 正**

Developments of New Technology in Rock Mechanics

—— from Micro to Macro ——

II: Mechanical Behavior of Rocks under Some Conditions — Hard Rocks

by

Yoshinori INADA* and Tadashi YAMABE**

Key words : Low temperature, High temperature, Rock, Compressive strength, Tensile strength

1 はじめに

エネルギー資源の乏しい我が国では、省エネならびにエネルギーの大型貯蔵は大きな課題である。また、国土面積も少なく、地形的に見ても75%が山で、25%が平野部という我が国の特殊な地形条件や開発にともなう環境問題等を総合的に考慮するとき、将来は地山岩盤中に掘削された地下岩盤空洞が大いに利用されていくであろう。地下には地下本来のすぐれた特性がある。すなわち「保温性」、「遮音性」、「恒湿性」、「耐震性」等である。

この場合、岩石の強度・変形問題いわゆる空洞の安定性は最も重要な課題である。とくに低温物質(LNG, LPG, 冷凍食品)や高温物質(熱水等)を岩盤内に貯蔵する場合には、空洞周辺岩盤は地山の自重のほか熱収縮や熱膨張による熱応力が加わるので、き裂が生じたり、繰返し熱疲労による強度の低下が生じる。

このように岩盤は熱の影響を大きく受けることになるが、受ける度合いも当然岩盤の種類や状態、温度条件等によって異なってくる。

本講座では硬岩を主体に低温や高温の影響を受けた岩石の力学挙動を室内実験の結果に基づいて述べ、次に実際に現場で岩盤の原位置実験を行った結果について述べる。

2 低温下における岩石の力学挙動

2.1 室内における実験の方法・装置

ここでは我が国ではどこでも分布している一般的な硬岩である花崗岩と安山岩を試料として用いた。花崗岩は愛媛県越智郡大島産(通称大島みかげ)を用い、安山岩は愛媛県上浮穴郡久万町産(通称久万石)を用いた。なお比較のため軟岩として泥岩(神奈川県相模原市産)、凝灰岩(栃木県宇都宮市大谷町産、通称大谷石)も用いた。

供試体は圧縮試験用のものは直径3cm、長さ6cmに、また圧裂引張試験で引張強度を求めたので直径3cm、長さ3cmに成形した。成形された供試体は次のような二通りの方法で処理した。

(1) 室内で約1週間自然乾燥させた後デシケータ内でさらに3日間乾燥させた。

(2) この乾燥状態の試料を真空状態にしたまま蒸留水を入れて試料を浸潤させ、さらに水中の気泡が岩石表面に付着して水が試料内に浸入するのを妨げないように真空を供用して24時間抜気した。

ここでは(1)の試料を“Dry”、(2)の試料を“Wet”と呼ぶことにする。

これらの試料の物理的性質を調べた結果を表Iに示した。この表から、硬岩の場合にはDryの状態でも水分は完全に蒸発せず内部にある程度残留しており、空隙率が大きい岩石ほど蒸発していることがわかる。

2.2 低温下における岩石の力学挙動

上述のように処理された供試体は低温槽内で冷却されたまま実験に供した。実験装置を概念的に示したものが図1である。

図2および図3はそれぞれ低温下における圧縮強度および引張強度の変化をとりまとめたものである。^{1)~6)}

いずれの岩石も温度の低下とともに著しく強度が上昇

表I 試料岩石の物理的性質

	Dry			Wet			比重(Dry)	
	空隙率 (%)	含水比 (%)	飽和度 (%)	空隙率 (%)	含水比 (%)	飽和度 (%)	真比重	カサ比重
花崗岩	1.99	0.16	20.67	1.99	0.54	70.86	2.673	2.625
安山岩	5.60	0.91	41.02	5.60	1.94	88.33	2.665	2.549
凝灰岩	37.09	1.39	5.76	37.09	24.01	99.62	2.446	1.560
泥岩	39.42	1.31	5.42	39.42	21.90	99.62	2.692	1.631

† 原稿受理 平成7年7月10日 Received July 10, 1995

* 正会員 愛媛大学工学部土木海洋工学科 〒790 松山市文京町, Dept. of Civil & Ocean Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790

** 埼玉大学工学部建設工学科 〒338 浦和市下大久保, Dept. of Civil & Environmental Eng., Saitama Univ., Shimo-ohkubo, Urawa, 338

図1 強度試験の概念図

図2 低温下における岩石の圧縮強度の変化

図3 低温下における岩石の引張強度の変化

していることがわかる。このことは、温度低下によって鉱物粒子は収縮してゆき、鉱物粒子そのものの強度は常温のそれよりも強くなってゆくものと思われる。一方、間隙中に含まれる水は 0°C 以下で氷となり、温度低下とともに氷そのものの強度も上昇していく⁷⁾。したがって一般的には岩石の強度は温度低下とともに上昇するものと推察される。

次に圧縮強度については常温において Dry よりも Wet の方が強度が低い。これは前述のように試料を Wet にする際に水が間隙内に浸入し、粒子間のマイクロクラックを増加させたり拡大させることや、圧縮試験の際 Wet 状態のものは間隙水圧が発生するためであると考えられる。

一方、 0°C 以下では引張強度において Dry よりも Wet の強度上昇の割合が大きい。これは間隙中の水が

氷となり、温度の低下とともに氷の強度も上昇するが、氷の圧縮強度は -20°C で 36 kgf/cm^2 、 -100°C で 74 kgf/cm^2 、 -160°C で 90 kgf/cm^2 と岩石のそれに比して非常に小さい。ただし軟岩においては、もともと強度が大きいので氷の膠結物質としての効果が現れている。一方、引張強度において、氷の引張強度は -20°C で 4 kgf/cm^2 、 -100°C で 9 kgf/cm^2 、 -160°C で 11 kgf/cm^2 と岩石のそれに比して近くなるため、氷の膠結物質としての効果は岩石の引張強度に顕著に現れるものと思われる。

次に圧縮強度の際に得られた応力-ひずみ曲線から破壊応力時の 30 % 付近の接線弾性係数およびポアソン比を求め、とりまとめたものが図 4 および図 5 である。空隙率の大きい岩石では膠結物質としての氷の影響がよく

図4 低温下における岩石の接線弾性係数の変化

図5 低温下における岩石のポアソン比の変化

現れており、弾性定数が大きくなることや、圧縮によるひずみを横方向にもよく伝え、ポアソン比が大きくなることがうかがえる。

低温下における岩石の弾性波伝ば速度を求めた結果を図6に示す。空隙率の大きい岩石ではWetの場合、低温下において氷の影響が顕著に現れており、弾性波伝ば速度の値が上昇していく様子がよくうかがえる。このことはこれまで述べてきた力学特性を裏付けているものと考えられる。

3 高温下における岩石の力学挙動

3・1 室内における実験の方法・装置

前章で述べた低温の場合と同じ岩石を用い、成形された供試体は低温での強度試験と同様、Dry および Wet

図6 低温下における岩石の弾性波伝ば速度の変化

の二種類の方法で処理し実験に供した。また実験は次の二通りの方法で行った。^{8)~10)}

(1) Dry の供試体を用いて室温下および 100°C の高温下にて実験を行った（以下 Dry 試験と呼ぶ）。

(2) Wet の供試体を用いて室温と同一温度に保った水中および約 100°C の熱水中で実験を行った（以下 Wet 試験と呼ぶ）。

図7および図8はそれぞれ高温下における圧縮強度および引張強度の変化を示している。まず常温下において Dry の供試体を Wet にすると圧縮強度、引張強度とも強度低下している。これは低温のところでも述べたのと全く同じ理由である。とくに安山岩の場合には変質緑泥石、斜長石、モンモリロナイト等の有色鉱物を試料全体で

図7 高温下における岩石の圧縮強度の変化

図8 高温下における岩石の引張強度の変化

図9 高温下における岩石の接線弾性係数の変化

1.7 % 程度含んでおり吸水により強度が著しく低下することがわかっている。

Dry 試験結果で花崗岩、安山岩とも 100°C 程度ではほとんど圧縮強度の低下はみられないが、引張強度はやや低下の傾向がみられる。これは構成鉱物粒子の膨張の差異によって助長される潜在的マイクロクラックの拡大が、圧縮強度よりも引張強度においてより敏感に強度の低下として現れたものと思われる。

また Wet 試験結果では両岩石とも、しかも圧縮強度、引張強度とも低下している。これは表面から浸入した間隙水が試験時に水圧として働き、強度低下を生じさせたものと思われる。とくに安山岩では前述の吸水によって強度低下する鉱物が熱水下ではさらに促進されることが、別の実験によりわずかながら熱水中に溶出することが確かめられているので、これらのことが強度低下に影響を及ぼしているものと考えられる。

次に圧縮強度試験時の応力-ひずみ曲線から破壊応力の 30 % 付近の接線弾性係数およびポアソン比を求め、とりまとめたものが図 9 および図 10 である。

常温下では Dry の供試体を Wet にすることによっていずれも接線弾性係数の値が小さくなっている。このことは、前述のとおり吸水によるマイクロクラックの拡大が原因であると思われ、とくに安山岩では吸水鉱物の影響もあり、Wet の供試体の方が Dry よりもひずみやすくなっているものと思われる。このことは、安山岩のポアソン比が Dry よりも Wet において値が大きいことからうかがえることである。また、接線弾性係数の値は Dry 試験の結果ではその値はほとんど変化していないが、Wet 試験の結果ではいずれも値が上昇する傾向がみられる。熱水下では構成鉱物粒子の膨張および浸入した間隙水によって空隙がある程度密になり、見掛け上外部からの力に抵抗し弾性定数が大きくなったものと思われる。

図10 高温下における岩石のポアソン比の変化

また、内部が密になることにより圧縮荷重が横方向にも伝えやすくなることからポアソン比がわずかながら上昇することがわかる。

次に高温下における Dry 状態での弾性波伝ば速度を求めた結果を図 11 に示す。Dry 状態での高温下ではいずれの岩石もほとんどその値が変化していないことがわかる。

4 低温下における原位置岩盤の力学挙動

低温環境におかれた硬岩の力学挙動を調べるためにき裂を含む原位置岩盤内に凍結管を設置し、その内部に冷媒を循環させる凍結融解試験を実施した。^{11), 12)}

4・1 釜石鉱山原位置凍結融解試験場の概要

原位置試験サイトに選定した釜石鉱山の坑道は標高

図11 高温下における岩石の弾性波伝ば速度の変化

550 m レベルで、試験サイトは坑口より約 1.5 km で鉱山の東端に位置し、土被りが約 250 m 程の切羽近傍の坑道底面を利用している。坑道は、高さ約 3.2 m、幅約 3.0 m のほぼ矩形の断面形状を有し、ほとんど無支保で維持されている。地質は比較的明瞭なき裂を含む花崗閃緑岩から成り、サイト周辺にある切羽奥には大きな断層が横切っていることが、他の坑道観察から推定された。また、切羽近くの側壁肩部に見られるき裂の一部から大量の湧水が見られ、岩盤の凍結に不可欠である水分の存在が確認された。このサイトを対象として原位置岩盤凍結・融解試験を計画し、8 サイクルの試験を実施した。

図 12 に原位置試験サイトの概念図を示す。図中の坑底面中央に直線状に並ぶ鉛直ボーリング孔は、岩盤冷却用の熱源となる凍結管を挿入するためのものである。原位置試験サイトにおいては岩盤を露出させるために、深さ 40 cm 程度に敷き詰められていた碎石を去除し、岩盤表面ができるだけ平坦になるように整地した。また、サイト表面に水が流入しないよう上・下流境界にコンクリート壁を設置して、これを遮断すると共に、排水パイプを通して坑内に集まる湧水を下流側へと導いた。

図12 釜石鉱山原位置凍結融解試験場の概略

凍結・融解試験を実施する前に、温度変化に伴う岩盤応力・変形挙動に不連続面として影響を及ぼし、かつ凍結域が成長するために必要な水の供給路（水みち）になると考えられるき裂の調査を試験サイトにおいて実施した¹³⁾。その結果、対象区域の表面には、大きく分類して2種類の開口き裂の発達が観察された。1つは緑泥石および緑簾石によって充填されたき裂（以後、緑泥石き裂と称する）であり、2つ目は主に方解石のような石灰石系の鉱物によって充填された（以後、方解石き裂と称する）き裂である。岩盤表面を観察した結果、方解石き裂は数は少ないが相対的に長いものが多く、き裂相互の連結性が良いことに加えて、ほとんど全てが表面で開口していた。一方、緑泥石き裂は多数存在し、これらの多くは NW-SE の走行を持っており、極く一部は岩盤表面で開いていることがわかった。また、これらのき裂の両側に、幅数 mm から数 cm のいわゆる bleaching 作用を受けた白色帯が見られた。

4・2 凍結・融解試験と計測システム

原位置試験サイトを凍結させる方法は、岩盤内に鉛直に挿入された9本の凍結管内にブラインクーラで冷やされたブライン液を送り、その周りの岩盤温度を低下させるブライン循環方式を採用している。坑道軸に沿ってφ76 mm の凍結管挿入孔を40 cm 間隔で設け、線状の熱源配置とした。凍結管の深さは2.5 m である。凍結管挿入後、挿入のために生じた周辺隙間の伝熱特性を岩盤と同等にするために、試験サイトの花崗閃緑岩をパウダー状にしたもので充填した。凍結過程では、凍結管内に流れ込む直前のブライン温度を测温抵抗体で感知し、連動した制御システムによりこれを常に−20°C に維持した。

融解試験ではブラインの循環を停止させ、岩盤表面などの周囲から伝わる熱で自然に融解させる方法を採用した。試験中の坑内温度は常に約 10°C 前後に保たれており、地下空洞の特徴である自然の恒温・恒湿性が活かされた。試験の1サイクルは、凍結過程で10日前後、融解過程で1カ月前後とし、この凍結・融解サイクルを繰返した。

このようにして与えた熱環境の変化に伴う岩盤中および表面の非定常温度分布の計測と熱応力によって発生する岩盤マトリクスの変形およびき裂開口変位を測定した。また、凍結前線の移動に伴い試験領域のき裂から湧き出した、あるいは領域外の表面から流入した水量変化を観察した。図 13 に試験サイト内の主要なき裂位置を考慮して配置した温度分布を測定するための観測孔と4種類の変位計設置箇所を示す。

岩盤内の温度を測定するために、凍結管軸に対しほぼ直交方向に3測線、合計23カ所の観測孔を配置した。ただし、その内の2測線は岩盤中の熱伝導に与えるき裂の影響を明らかにするために、開口している方解石き裂に着目し、その近傍に沿って設けている。温度測線の延長は全て1.9 m であり、測線 No. は北から、観測孔の No. は東から順に付した。岩盤内温度の測点は基準面からの深度1, 2, 3 m 地点とし、観測孔毎に所定の深

さまで熱電対を挿入設置した。使用した全ての熱電対は、 0°C 付近での応答特性に優れた T 型（銅-コンスタン）である。また測点間隔を保つため、比較的熱伝導性が低いアクリル棒にあらかじめ 1 m 間隔で熱電対を貼り付け、孔内設置用のガイドとして使用した。これらを挿入後、凍結管の場合と同様に孔内の間隙に花崗閃緑岩のパウダーを充填している。

次に、変位の計測状況について述べる。き裂の開口変位の測定は、方解石および緑泥石き裂をまたぐようにして、B1~B9 で表す単軸き裂変位計、および C1~C3 で表すせん断方向の変位も測定可能な二軸き裂変位計を設置した。特に、き裂変位計の極近傍には熱電対を配置し、岩盤表面の温度も測定している。岩盤マトリクス部の変形挙動を測定する際には、方解石き裂によりブロック状に分断されている東側に重点をおき、それらを把握するために 3 方向の変位成分を計測可能な変位計 (A1~A6) を配置した。3 成分変位計は試験サイト上方に架けられた 2 本の Support Bar に不動点を取り、その支点は試験サイトより十分離して設置した。さらに、凍結融解試験場の広い領域で生じた変形を計測する目的で、マイクロクリーブメータとインバー線とを結合した長尺変位計を設置した。図 13 に、D1~D4 で示す井桁状の 4 測線がこの長尺変位計の計測位置をあらわしている。温度および変位データは、データロガーを使用し、10 分間隔にて自動サンプリング・記録している。

4.3 計測結果とその解釈

凍結融解試験を繰返し実施した時の代表的な測点の温度経時変化を図 14 に示す。図に使用したデータは、第 2 サイクル時に測線 1 第 3 計測孔の深度 1, 2, 3 m 測点で計測されたものである。いずれの深度においても初期段階における熱伝達速度が速いことは図から明らかである。また、温度 0°C 近傍で、潜熱の影響と見られる区間がある。次に、深度毎の経時温度変化を比較する。深度 3 m 測点の温度は、他の 2 つの深度と比べて全体的に温度が高い。これは、低温熱源である凍結管が岩盤中の深さ 2.5 m までしか挿入されていないことに起因している。また、深度 1, 2 m 測点の温度を比べるとほぼ同様な変化を示しているが、やや深度 1 m 測点の温度の方が高い傾向にある。これは、坑内の環境温度が常に一定で、岩盤中の温度より気中の温度が高くなること

によって、岩盤表面より熱が伝達された結果であると考えられる。以上の傾向は他の計測点においても全く同様である。

次に、岩盤中の非定常水平温度分布特性に着目する。図 15 に、第 3 サイクル時の凍結過程において測線 1 に沿う深度 1 m 地点で計測された岩盤中の温度分布の経時変化を、また図 16 に融解過程における温度変化をそ

図15 凍結過程の測線 1 深度 1 m における温度分布変化

図16 融解過程の測線 1 深度 1 m における温度分布変化

れぞれ示す。試験開始前は測線に沿いほぼ一定であった岩盤温度は、凍結過程に入るとすぐに凍結管軸上に位置する観測孔 No. 4 で温度が低下し、そこを中心として左右ほぼ対称に下に凸状の温度分布形状を描く。凍結過程終了直前では、凍結管により近い観測孔の熱伝達速度ほど遅くなっている傾向が読取れる。融解過程では先に記したように、坑内気中およびサイト周辺岩盤の内部温度を熱源とした自然融解方式を採用しているため、融解初期ではこれら環境温度との温度勾配が大きい測線中心部ほど早く温度が上昇し、次第にはほぼ様な水平温度分布形状を描き、凍結前の初期岩盤温度へと近づくことがわかる。

5 おわりに

本稿では、硬岩を主体に低温や高温の影響を受けた岩石の力学挙動を室内実験の結果に基づいて述べた後、実際に原位置岩盤の凍結融解試験を実施した結果から、低温下におけるき裂性岩盤の非定常な温度変化について紹介した。

参 考 文 献

- 1) Y. Inada and K. Yokota, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **21**, 145 (1984).
- 2) 稲田善紀, 八木則男, 愛媛大学紀要第三部工学, **9**, 477

(1981).

- 3) 稲田善紀, 八木則男, 材料, **28**, 979 (1979).
- 4) 稲田善紀, 八木則男, 材料, **29**, 1221 (1980).
- 5) 稲田善紀, 畑野俊一郎, 関 正造, 成行 惇, 越智健三, 岩の力学連合会第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 461 (1994).
- 6) 稲田善紀, 藤原斉郁, 畑野俊一郎, 門田俊一, 土木学会論文集, **499/III-28**, 23 (1994).
- 7) 稲田善紀, 垣見創世, 栗林正忠, 土木学会中国四国支部昭和63年度研究発表会講演概要集, p. 332 (1988).
- 8) 稲田善紀, 横田公忠, 時川 忠, 愛媛大学工学部紀要, **11**, 165 (1986).
- 9) 稲田善紀, 横田公忠, 時川 忠, 土木学会論文集, **499/III-5**, 217 (1986).
- 10) 稲田善紀, 小島正靖, 成行 惇, 越智健三, 土木学会中国四国支部平成6年度研究発表会講演概要集, p. 67 (1994).
- 11) K. Watanabe, S. Takeda, T. Yamabe and K. Ishiyama, Proc. of Assessment and Prevention of Failure Phenomena, p. 265 (1993).
- 12) 山辺 正, 渡辺邦夫, 黒澤 聡, 石山宏二, 野本 寿, 岩の力学連合会第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 211 (1994).
- 13) 武田聖司, 石山宏二, 渡辺邦夫, 山辺 正, 土木学会第25回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, p. 226 (1993).

書 評

“技術者の心眼”

E. S. ファーガソン (著), 藤原良樹, 砂田久吉 (訳)

(1995年, 平凡社発行, A 5 判, 286ページ, 定価3200円)

本書は、アメリカの技術史家である E. S. ファーガソンによって書かれた、「Engineering and Mind's eye」の訳書である。

心眼 (Mind's eye) とは著者の定義によると、簡単に言えば視覚, 触覚, 聴覚などの感覚的情報を相互につないで関係づけるすべての経験の元締めとなる器官であるという。このような視覚的思考は工学には不可欠なものである。心眼により、技術者は、詳細に描かれた図面から、設計者がどのようなものを作ろうとしているのかをイメージすることができる。

著者は、最近のコンピュータの発達などによってもたらされてきた理論計算によってすべてが解決するはずであるといった考え方が支配的である風潮, つまり直接の体験に基づく知識と洞察の蓄積, すなわち、「心眼を用いた思考」の軽視を憂慮している。このような考えは、技術は研究よりも下であるという見方を助長してしまう。こういった見方を打ち破るべく、心眼を用いた思考がいかに現在の工学を作り上げてきたかを、多くの例を挙げながら述べている。現在使われている道具がいかにして現在の様な形へと変化してきたのかを考えると、その形は理論によってはじき出すことが可能なのか? 著者によると答えはノーである。コンピュータの発達は考慮しうる条件の数を増やすことはできるかもしれないが、それでもすべての条件を網羅することはできない。また、「近代的な設計」を行ない非ののないものと考えられていたハートフォード体育館の屋根のそれほどでもない積雪荷重による倒壊や、まだ記憶に新しいハッブル望遠鏡の様々な故障などが、心眼による思考が欠如したために起こったものの例として取り上げられている。

著者はまた、教えるのが容易な解析的手法の教育に偏ってしまった工業教育にも警鐘を鳴らしており、頭で覚える知識だけでなく、体で覚える技術も同じくらい重要であることを強調している。本書は、エンジニアに対してのみならず、工業教育に携わるものに対しても、エンジニアの持つべき姿勢を教えてくれる。

(姫路工業大学 松尾 吉晃)